

# RESPUESTA MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL CARIBE COLOMBIANO ANTE EVENTOS EXTREMOS DE OLEAJE

Jairo Eduardo Cueto Fonseca y Luis Jesús Otero Díaz

Grupo de Investigación en Geociencias GEO4 – Universidad del Norte, Colombia.  
E-mail: jecueto@uninorte.edu.co y ljotero@uninorte.edu.co

## Introducción

El oleaje es el parámetro más importante que influencia sobre la morfodinámica en zonas costeras, donde una parte significativa de la población vive. Tormentas suficientemente energéticas son capaces de cambiar drásticamente los perfiles de las playas, causando severas modificaciones en la línea de costa e inundaciones, afectando comunidades localizadas cerca al mar.

El área de estudio del presente trabajo comprende las playas de Bocagrande (Cartagena, Bolívar) y Costa Verde (Ciénaga, Magdalena), ambas ubicadas en el Mar Caribe que yace sobre la costa norte de Colombia. La playa de Bocagrande se caracteriza por ser disipativa y presentar arenas finas, mientras que la playa de Costa Verde presenta características de playa intermedia-reflejante con arenas medias. Debido a su localización geográfica, Bocagrande y Costa Verde están influenciadas por la migración de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), la cual es un cinturón de baja presión que ciñe el globo terrestre en la región ecuatorial, oscilando estacionalmente entre el Norte y el Sur del Ecuador. Éste desplazamiento determina las épocas climáticas características del Caribe colombiano y hace que se presente un régimen climático bimodal, con dos temporadas secas, la primera de diciembre a marzo y la segunda los meses de junio y julio, y dos temporadas lluviosas, la primera los meses de abril y mayo y la segunda de agosto a noviembre (Poveda, 2004).

Dado que el viento es el principal generador del oleaje, los cambios en las alturas de las olas están sujetas a su variación. Huracanes y frentes fríos, fenómenos en los cuales las velocidades del viento son muy altas, son los causantes de los eventos extremos de oleaje en el Caribe colombiano (Otero et al., 2016). Los frentes fríos ocurren cuando dos masas de aire a distintas temperaturas y densidades se acercan. La masa de aire frío más densa empuja al aire caliente, haciéndolo ascender. El aire caliente mientras asciende se enfría, generando nubes, tormentas, fuertes vientos y un gradiente de presión en el área (Ortiz, 2012).

El principal objeto de este estudio es describir la respuesta morfodinámica de las playas del Caribe colombiano ante eventos extremos de oleaje, en este caso específico el paso del frente frío de marzo de 2009 y el huracán Matthew, usando como herramienta de modelación XBeach (Roelvink, 2009). XBeach es un modelo numérico de código abierto originalmente desarrollado por la Universidad de Delft para simular procesos hidrodinámicos y morfodinámicos en playas arenosas con un dominio de kilómetros y en la escala de tiempo de tormentas (Roelvink, 2009). Este modelo resuelve procesos hidrodinámicos asociados a las ondas gravitatorias (refracción, asomeramiento y rotura), infragravitatorias, *setup* inducido por el oleaje y corrientes; y procesos morfodinámicos, tales como erosión de dunas y transporte de sedimentos.

Conocer a fondo la hidrodinámica de las playas y sus condiciones morfológicas permitirá construir modelos más precisos de las dinámicas de erosión y acreción en las áreas de interés, y a su vez, permitirá diseñar con criterios más robustos obras de ingeniería costera y proteger a la población de posibles amenazas provenientes del mar.

## Metodología

En primera instancia, se recolectaron datos de variables hidrodinámicas y características morfológicas de las playas de Bocagrande y Costa Verde en campañas realizadas durante noviembre de 2014 (época húmeda) y febrero de 2015 (época seca). Con la ayuda de sensores de presión y correntómetros se lograron captar los distintos procesos de transformación del oleaje según el tipo de perfil de la playa.

Paralelamente, se extraen series de oleaje a partir de las boyas de reanálisis BV07 (Ciénaga) y BV10 (Cartagena) ubicadas en la zona Caribe Central de Colombia de acuerdo con Otero et al. (2016). Estas series cuentan con más de 30 años de datos de oleaje, desde el año 1979 hasta mediados de la década de 2010. A partir de las series de oleaje extraídas se obtienen variables hidrodinámicas características (altura significativa, periodo pico y dirección media) durante el paso de dos eventos extremos a recrear por el Caribe colombiano. Los eventos extremos escogidos fueron el frente frío de marzo de 2009 y el huracán Matthew en septiembre-octubre de 2016, debido a su impacto en las playas de estudio.

El primer evento a modelar, el frente frío de 2009, se caracterizó por presentar alturas significantes de ola de hasta 2.6 m en la BV10 y 2.2 m en la BV07, con el oleaje proveniente de la dirección Norte. Este evento mantuvo una duración de cinco días, desde marzo 5 hasta marzo 10 de 2009 (Ortiz et al., 2012). Por otro lado, durante el paso del huracán Matthew por costas colombianas en 2016 la altura significativa del oleaje llegó a ser de hasta 3.2 m en la BV10 y 2.1 m en la BV07, también proveniente de la dirección Norte. Matthew afectó durante tres días la zona de estudio, según las series de las boyas de reanálisis analizadas. La propagación del oleaje desde las boyas virtuales de reanálisis en aguas profundas hasta aguas someras se ejecutó con el modelo SWAN (*Simulating WAves Nearshore*) (Booji & Holthuijsen, 1987).

Una vez realizada la caracterización de las playas de estudio se procedió a calibrar y validar el modelo XBeach con los datos experimentales (ver Figura 2). En total se modelaron 160 estados de mar para las playas de estudio, 40 estados por época (seca y húmeda) en Bocagrande y Costa Verde. Posteriormente, con los parámetros calibrados en cada playa y los resultados arrojados por SWAN, se modelaron en XBeach los eventos extremos seleccionados para la zona de estudio.

## Resultados

En la Figura 1 se aprecia la comparación entre los datos medidos *in situ* para la altura significativa de ola en las playas de estudio y la serie modelada con el modelo numérico XBeach. Estos resultados pertenecen a la calibración y validación del modelo para las épocas húmeda y seca en un estado de mar determinado. Se logra evidenciar que el modelo XBeach representa de manera correcta el comportamiento hidrodinámico de las playas de Bocagrande y Costa Verde. Los estadísticos que revelan el desempeño de XBeach modelando la hidrodinámica de las playas de estudio se presentan en la tabla 1.

Por otro lado, el modelo realizado en XBeach para la morfodinámica de las playas estudiadas arrojó resultados donde se aprecia un retroceso en la sección transversal del fondo. Al

mismo tiempo, se nota una redistribución significativa del sedimento que conforma las playas, especialmente en Bocagrande, tomando la forma de un perfil aún más disipativo (ver Figura 2, parte superior). En la playa de Costa Verde no es tan notorio esta redistribución sedimentaria influenciada por el paso del frente frío y el huracán (ver Figura, 2 parte inferior).

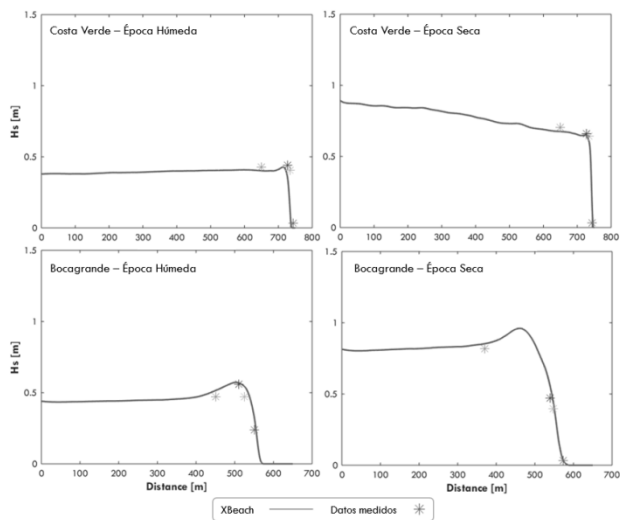


Figura 1.- Altura significativa de la ola medida *in situ* vs. Serie modelada con XBeach. Costa Verde (arriba) y Bocagrande (abajo).

Tabla 1.- Estadísticos para la calibración y validación del modelo en XBeach para las playas de Bocagrande (a) y Costa Verde (b).

a)

| BG             | S1     | S2      | S3      |
|----------------|--------|---------|---------|
| R <sup>2</sup> | 0.9070 | 0.8804  | 0.8425  |
| Bias           | 0.0127 | -0.0083 | -0.0350 |
| Willmott       | 0.9720 | 0.9482  | 0.8324  |

b)

| CV             | S1      | S2      | S3      |
|----------------|---------|---------|---------|
| R <sup>2</sup> | 0.8762  | 0.8568  | 0.8114  |
| Bias           | -0.0109 | -0.0012 | -0.0123 |
| Willmott       | 0.9629  | 0.9562  | 0.9391  |

### Conclusiones

Mediante modelación numérica con XBeach se pudieron evidenciar los cambios morfológicos inducidos por el oleaje de los eventos extremos del frente frío de marzo de 2009 y el huracán Matthew en los perfiles de playa de Bocagrande y Costa Verde.

De manera general, se logra apreciar en los resultados que la morfodinámica de la playa de Bocagrande es afectada en mayor medida, perdiendo una cantidad no despreciable de sedimento. Este hecho obedece a que el oleaje en dicha playa tiende a ser más energético que en Costa Verde, donde la altura de ola suele ser más baja por efectos de refracción y difracción al aproximarse a la costa. Además, el oleaje llega de manera perpendicular al pie del perfil en Bocagrande, incrementando su incidencia en la evolución morfológica de esta playa al disiparse con más ligereza.

El retroceso del perfil en Bocagrande puede llegar a ser crítico en ambos eventos extremos, retrocediendo entre 100 y 150 metros. Bajo estas condiciones se pueden presentar severas afectaciones a la población viviendo en cercanías al mar, generándose inundaciones al desaparecer la barrera natural que conforman las dunas de la playa.

Por otro lado, en Costa Verde el retroceso observado en los resultados es menos pronunciado, permaneciendo estable entre los 20 y 30 metros. El cambio morfológico en el perfil de playa en Costa Verde no resulta peligroso para la comunidad que habita próxima a la costa y no evidencia cambios significativos en su estructura original ante el paso del huracán Matthew o el frente frío de marzo de 2009.

### Referencias

Booij N and Holthuijsen LH. (1987). "Propagation of ocean waves in discrete spectral wave models". *Journal of Computational Physics*.

Ortiz, J.C.; Salcedo, B. and Otero, L.J. (2012). "Investigating the Collapse of the Puerto Colombia Pier (Colombian Caribbean Coast) in March 2009". *Journal of Coastal Research*.

Ortiz, J.C. (2012). "Exposure of the Colombian Caribbean coast, including San Andres Island, to tropical storms and hurricanes, 1900–2010". *Natural Hazards and Earth System Sciences*.

Otero, L.J.; Ortiz J.C.; Ruíz, J.K.; Higgins, A. and Henriquez S.A. (2016). "Storms or cold fronts: what is really responsible for the extreme waves regime in the Colombian Caribbean coastal region?". *Natural Hazards and Earth System Sciences*.

Poveda, G. (2004). "La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna". *Ciencias de la Tierra*.

Roelvink, D.; Reniers, A.; Van Dongeren, A.; Van Thiel de Vries, J.; McCall, R. and Lescinski, J. (2009). "Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands". *Coastal Engineering*.

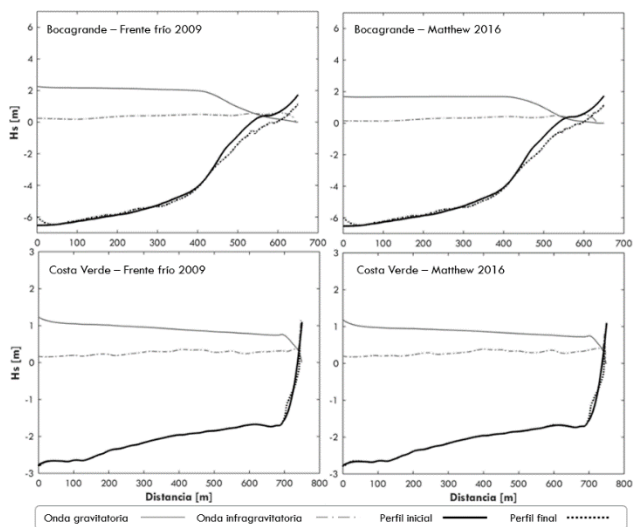


Figura 2.- Evolución morfológica de Bocagrande (arriba) y Costa Verde (abajo) modelando el paso del frente frío de 2009 y el Huracán Matthew en XBeach.